

MTA doktori értekezés tézisei

Nagy intenzitású impulzusok a terahertzes és a látható tartományban

Fülöp József András

MTA-PTE Nagy Intenzitású Terahertzes Kutatócsoport

Pécs, 2017.

I. Tudományos előzmények, célkitűzések

Elektromágneses sugárforrások alkalmazási lehetőségeit meghatározza azok koherenciája, sávszélessége, valamint intenzitása vagy térerőssége. Rendkívüli koherenciája miatt a lézerfény energiája rendkívül keskeny spektrális vagy időbeli tartományba koncentrálható. Nagyon kis spektrális szélesség és nagy frekvenciastabilitás szükséges a precíziós spektroszkópiához. Gyors folyamatok időbeli vizsgálata nagyon rövid időtartamú impulzusokkal lehetséges, amelyek nagy sávszélességgel rendelkeznek. Ultrarövid impulzusok segítségével extrém nagy intenzitások és térerősségek érhetők el, ami például lézeres részecskegyorsításra használható.

A lézerek erősítőközegének korlátozott sávszélessége határt szab az elérhető impulzushossznak. Spektroszkópiai alkalmazásokhoz gyakran olyan hullámhosszak szükségesek, amelyek közvetlenül nem, vagy csak nehezen érhetők el lézerekkel. A lézerfény nemlineáris frekvencia-átalakítása vagy spektrális kiszélesítése ezért nagy gyakorlati jelentőséggel bír. Nemlineáris optikai folyamatok, mint pl. az optikai parametrikus erősítés, akár a legnagyobb intenzitások elérését is lehetővé tehetik. A nemlineáris optikai frekvencia-átalakítás és erősítés alapvető szerepet játszott abban, hogy a lézerek a tudomány és a technika különböző területein – a mikrohullámoktól a röntgen tartományig – rendkívül széles körben használt eszközzé váltak.

Munkám egyik célja a nagy teljesítményű, néhány ciklusú, látható vagy közeli infravörös tartományba eső impulzusok előállítására alkalmas optikai parametrikus erősítési technológia továbbfejlesztése volt. Ezzel kapcsolatos eredményeimet a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben és a müncheni Ludwig Maximilians Egyetemen dolgozva értem el. Az eredmények nagy teljesítményű, kevés ciklusú fényimpulzusok, valamint ezek segítségével akár atomi skálájú tér- és időbeli

felbontást lehetővé tevő röntgenimpulzusok és elektroncsomagok előállításában használhatók.

Nemlineáris optikai frekvencia-átalakítással – például optikai egyenirányítás segítségével – az elektromágneses spektrumban az infravörös és mikrohullámú tartomány között elhelyezkedő terahertzes (THz-es) tartományban is kelthetők rövid impulzusok. THz-es sugárzás segítségével jól vizsgálhatók kis gerjesztési energiájú szabadsági fokok; elegendően nagy térerősség esetén pedig akár kontrollálhatók is. Extrém nagy térerősségű THz-es impulzusok segítségével kompakt részecskegyorsítók és röntgenforrások építhetők, amelyek a jövőben fontos szerepet játszhatnak az anyagvizsgálat és a sugárterápia számos területén.

Munkám másik fő célja optikai egyenirányításon alapuló, döntött impulzusfrontú lézerimpulzusokkal pumpált, optikai egyenirányításon alapuló THz-es források fejlesztése volt. Ezzel kapcsolatos eredményeimet főként a Pécsi Tudományegyetemen értem el, szorosan együttműködve több akadémiai és ipari partnerrel. A fejlesztő munka kiterjedt extrém nagy energiájú, illetve nagy átlagteljesítményű, LiNbO_3 anyagú, továbbá nagy hatásfokú, nagy energiára skálázható, félvezető anyagú THz-es forrásokra. Az alkalmazási lehetőségek közé tartozik a nemlineáris THz-es spektroszkópia, anyagi rendszerek rezonáns és nem rezonáns kontrollja, vagy kompakt THz-es részecskegyorsítók meghajtása.

II. A vizsgálatok módszerei

Optikai parametrikus erősítéssel kapcsolatos munkámhoz pikoszekundumos és femtoszekundumos fényimpulzusok energiájának, valamint időbeli, spektrális és térbeli jellemzőinek mérésére alkalmas eszközöket használtam. Az időbeli mérésekhez autokorrelátorokat, FROG és SPIDER berendezéseket használtam. A néhány ciklusú femtoszekundumos impulzusok időbeli összenyomása egyedi tervezésű sokrétegű dielektrikumtükrök

segítségével történt. Frekvenciakétszerezésre és optikai parametrikus erősítésre különböző nemlineáris optikai kristályokat használtam. Esetenként szükség volt a lézernyalábok térbeli szűrésére, valamint spektrális kiszélesítésére is. Utóbbi nemesgázzal töltött üveg kapillárisban történt. A keskenysávú pikoszekundumos impulzusok formálását egyedi tervezésű interferométer segítségével oldottam meg, az erősítés regeneratív erősítőben történt. Numerikus szimulációk során a csatolt hullámegyenleteket oldottam meg, illetve lézer erősítés esetében a Frantz-Nodvik modellt használtam.

THz-es impulzusok keltésére LiNbO_3 , ZnTe és GaP kristályokat használtam. A LiNbO_3 kristályok jellemzően 0.6% MgO adalékolású sztöchiometrikus kristályok voltak; az adalékolásra a fotorefrakció csökkentése miatt volt szükség. A különböző pumpáló impulzusokat Yb aktív anyagú lézerek, illetve félvezetők esetében infravörös tartományban működő optikai parametrikus erősítők szolgáltatták. A pumpáló impulzusfront megdöntésére optikai rácsokat, lencsákat, illetve ZnTe esetében a nemlineáris kristály belépő felületén kialakított bináris rácsot használtam. A THz-es impulzusok energiájának mérésére piroelektromos detektorokat, a nyalábprofil mérésére egyszerű késél-módszert vagy piroelektromos kamerát használtam. A hullámformát elektro-optikai mintavételezéssel mértem, amelyből Fourier-transzformáció segítségével kapható a spektrum. Esetenként Michelson-interferométeren alapuló Fourier-transzformációs spektrométert is alkalmaztunk. A mérés és az adatgyűjtés általában számítógépes vezérléssel történt; ezen kívül oszcilloszkópokat, lock-in erősítőt, boxcar integrátort, egyéb mérő és vezérlő berendezéseket használtunk. Numerikus szimulációkhoz a csatolt hullámegyenleteket oldottam meg.

III. Új tudományos eredmények

1. Optikai parametrikus erősítők nagyobb hatásfokú pumpálása, valamint az erősítés spektrumot torzító hatásának csökkentése

elérhető a pumpáló impulzusok megfelelő időbeli alakformálásával. Ebből a célból keskenysávú pikoszekundumos impulzusok alakformálására javasoltam egy interferométert, amely kettőstörő anyagú prizmapárokat alkalmaz nyalábosztóként és a nyalábok újraegyesítésére. Az eszközzel az impulzusok replikálásán alapuló impulzusformálás által megengedett minden szabadsági fok – relatív intenzitások, impulzusok közötti késleltetések interferometrikus és nagyobb léptékű skálán – függetlenül állítható. Megépítettem egy prototípust és demonstráltam a flexibilis impulzusformálás lehetőségét 100 mJ szintű impulzusenergiáig [1].

2. Demonstráltam kevés ciklusú impulzusok ultranagy sávszélességű csörpölt impulzusú optikai parametrikus erősítést (OPCPA) 250 μ J impulzusenergiáig rövid impulzusú (\sim 100 fs), 395 nm központi hullámhosszú pumpálást használva [2]. Egyedi tervezésű dielektrikumtükrök segítségével az erősített impulzusokat összenyomtam 8 fs időtartamra, a Fourier-limit közelébe. Ezzel megmutattam, hogy a rövid impulzusokkal pumpált OPCPA alkalmas nagyintenzitású, kevés ciklusú impulzusok előállítására és így alapja lehet TW–PW teljesítményű OPCPA rendszereknek is.
3. Kifejlesztettem egy numerikus modellt [3], amely alkalmas döntött impulzusfrontú gerjesztéssel történő optikai egyenirányításon alapuló THz-es források lehetőségeinek és korlátainak vizsgálatára [4,5]. A modell figyelembe veszi a pumpáló impulzus hosszának anyagi és szögdiszperzió miatt bekövetkező változását, a THz-es tartományban a közeg lineáris abszorpcióját, valamint a gerjesztő fényimpulzusok többfotonos abszorpciója révén keletkező szabad töltéshordozók okozta THz-es abszorpciót. A modell segítségével tanulmányoztam a THz keltés hatásfokának, valamint a THz-es impulzusok térerősségnek és spektrális intenzitáseloszlásnak a függését a Fourier-limitált pumpáló

impulzushossztól, a kristály hőmérsékletétől és hosszától [6]. Megmutattam, hogy megadható optimális impulzushossz, amellyel a THz keltés hatásfoka [3] illetve térerőssége [7] maximalizálható. Megmutattam, hogy LiNbO₃ esetében a mások által jellemzően használt ~100 fs helyett hosszabb, 500 fs körüli pumpáló impulzushosszat használva a hatásfok hatszorosra növelhető [7]. További 4–6-szoros növekedés várható a kristály alacsony hőmérsékletre való hűtésétől [7].

4. Extrém nagy energiájú THz-es impulzusok előállításához szükséges a pumpált foltméret jelentős, akár több cm-re való növelése. Kifejlesztettem egy kétdimenziós modellt döntött impulzusfrontú pumpálással való THz keltés leírására, amely figyelembe vette a pumpa és a THz-es nyalábok nemkollineáris terjedését kiterjedt nyalábok esetében [3]. Numerikus számításokkal megmutattam, hogy a rácsból és lencséből álló impulzusfront-döntő elrendezésnél a leképezési hibák a THz-keltés hatásfokát jelentősen csökkenthetik LiNbO₃-ban [8]. Megmutattam, hogy a teleszkópot, illetve az általunk újonnan javasolt kontakt rácsot alkalmazó elrendezéseknél ez a hatásfokcsökkenés nagymértékben enyhíthető, illetve kiküszöbölhető [8]. Megmutattam továbbá, hogy a leképezési hibák a THz-es nyaláb torzulását okozhatják [3]. A leképezés optimalizálásával ez a torzulás jelentősen csökkenthető, a kontaktrácsos elrendezéssel keltett THz-es impulzusok pedig mentesek az ilyen torzulásoktól.
5. Kísérletileg megmutattam, hogy LiNbO₃ kristályban a THz keltés hatásfoka jelentősen megnövelhető, ha a széles körben használt ~100 fs-os pumpáló impulzushossz helyett hosszabb pumpáló impulzusokat használunk. Az elméletileg jóslott ~500 fs-os optimumnál hosszabb, 1,3 ps-os impulzushosszú pumpálással és optimalizált leképezéssel 125 μ J energiájú THz-es impulzusokat állítottam elő 0,25% hatásfokkal [9]. Mind az elért energia, mind a hatásfok mintegy 2,5-szer volt nagyobb a mások által korábban elért legnagyobb értékeknél. Az

optimumhoz közelebb eső, 785 fs-os hosszúságú pumpálással sikerült több mint 0,4 mJ energiájú THz-es impulzusokat előállítani 0,77% hatásfokkal [10]. Az elért impulzusenergia közel egy nagyságrenddel haladta meg a korábban mások által elért legnagyobb értéket.

6. Nagy THz-es impulzusenergiáknál kísérletileg megmutattuk, hogy a THz keltés hatásfoka a LiNbO₃ kristály hűtésével jelentősen növelhető, összhangban a számításokkal. Ez a növekmény mintegy négyszeres volt 45 μJ impulzusenergiáig [11], e fölött 100 μJ impulzusenergiáig közel háromszoros, e fölött 186 μJ energiáig pedig 2,5-szeres [10]. Hűtött LiNbO₃ kristályt, közel optimális pumpáló impulzushosszat és optimalizált leképező elrendezést használva előállítottam és jellemeztem extrém nagy, 1 MV/cm nagyságrendbe eső térerősségű, alacsony (<0,4 THz) frekvenciájú THz-es impulzusokat [10]. Ezzel elsőként demonstráltunk evaneszcenszerű protongyorsításra alkalmas THz-es impulzusokat az ehhez optimálisan illeszkedő alacsony frekvenciás tartományban.
7. Egy intenzív THz-es impulzus nemlineáris kölcsönhatás (pl. összeg- és különbségi-frekvencia keltés) révén az őt keltő pumpáló impulzus spektrális kiszélesedését okozhatja. A kezdeményezésemre elvégzett numerikus szimulációk szerint LiNbO₃-ban ez a spektrális kiszélesedés jelentősen lecsökkentheti a THz keltés effektív kölcsönhatási hosszát, amely – a nemkollineáris fázisillesztési geometria miatt – a THz nyalábméret intenzitásfüggő változását okozhatja. Kísérletileg kimutattuk ezt a nyalábméret-változást mind a közeli, mind a távoli zónában [12]. A THz-es nyaláb ilyen nemlineáris torzulásának figyelembevétele nagyintenzitású THz-es forrásoknál és ezek alkalmazásainál fontos lehet.
8. Nagy átlagteljesítményű THz-es forrásokat vizsgáltam és terveztem, amelyek lineáris és nemlineáris THz-es spektroszkópiái vizsgálatokban vagy THz-es képalkotásban lehetnek előnyösek. Kis ($\lesssim 10 \mu\text{J}$) impulzusenergiájú, nagy

(1 MHz–100 MHz) ismétlési frekvenciájú lézerekkel való pumpáláshoz kettős (pumpa és THz) hullámvezető struktúrájú, döntött impulzusfrontú pumpálással gerjesztett THz-es forrást vizsgáltam és optimalizáltam numerikus szimulációk segítségével, a THz-es hullámvezető diszperzió és effektív abszorpciós együttható figyelembevételével [13]. Ebben az általunk javasolt elrendezésben a THz-es hullámvezető magját nagy nemlinearitású, de egyben nagy abszorpciójú anyag alkotja (pl. LiNbO_3). Az abszorpció hatása a kismértékben elnyelő hullámvezető köpennyel jelentősen csökkenthető. Megmutattam, hogy a hullámvezető diszperzióját kihasználva növelhető az effektív kölcsönhatási hossz és a THz keltés hatásfoka több mint húszszorosra, a spektrális intenzitás több mint ötvenszeresre növelhető a tömbi LiNbO_3 kristálybelihez képest. Nagyobb ($10 \mu\text{J}$ – $300 \mu\text{J}$) impulzusenergiájú, 50 kHz–300 kHz ismétlési frekvenciájú pumpáláshoz tömbi LiNbO_3 kristályon alapuló THz-es forrást terveztem és teszteltem [14].

9. Numerikus számításokkal megmutattam, hogy félvezető anyagok alkalmasak lehetnek nagy intenzitású THz-es impulzusok hatékony előállítására [3,15,16]. Ennek feltétele az alacsonyrendű többfotonos (a két- és lehetőleg a háromfotonos) abszorpció kiküszöbölése elegendően hosszú hullámhosszú infravörös pumpálás alkalmazásával. Így jelentősen csökkenthető a szabad töltéshordozók okozta abszorpció a THz-es tartományban és nagyobb pumpáló intenzitás használható. A pumpáló és a THz-es impulzusok közötti sebességillesztés a pumpa impulzusfrontjának megdöntésével lehetséges. Számításokkal megmutattam, hogy a félvezetőkkel elérhető hatásfok akár két nagyságrenddel megnövelhető, ha a két- és háromfotonos abszorpció hatását kiküszöböljük [3,15] és így a LiNbO_3 -belit elérő vagy akár meghaladó hatásfok várható. Kísérletileg megmutattam, hogy ZnTe -ban a THz keltés hatásfoka több mint egy nagyságrenddel megnövelhető (mások korábbi eredményeihez képest) a kétfotonos abszorpció

kiküszöbölésével és további 3,5-szeres növekedése érhető el, ha a háromfotonos abszorpciót is kiküszöböljük [15].

10. Megvalósítottam egy félvezető anyagú kontaktrácsos THz-es forrást és demonstráltam THz-es impulzusok nagy (0,3%) hatásfokú keltését [17]. A kollineáris pumpálási geometria az alkalmazások szempontjából igen előnyös és a THz-es nyaláb jó fókuszálhatóságát is biztosítja. A forrás egyszerűen – a felület és a pumpáló energia növelésével – skálázható akár mJ-szintű energiára.
11. Számolásaink szerint a THz keltés hatásfoka, valamint a THz-es impulzusok energiája és térerőssége jelentősen tovább növelhető többek között nagyobb kristályvastagság, optimális pumpáló impulzushossz és intenzitás, illetve a ZnTe-nál várhatóan kedvezőbb tulajdonságú GaP alkalmazásával [15–17]. Kísérletileg megmutattam, hogy – a számolásokkal összhangban – félvezető anyagok alkalmasak nagy energiájú THz-es impulzusok hatékony előállítására [15]. ZnTe-ban a két- és háromfotonos abszorpciót egyaránt kiküszöbölő $1,7 \mu\text{m}$ hullámhosszú, leképezést alkalmazó döntött impulzusfrontú pumpálást használva 0,7% hatásfokot értem el, amely 220-szor nagyobb, mint amit korábban mások ugyanebben az anyagban értek. Az elért $14 \mu\text{J}$ THz-es impulzusenergia egy nagyságrenddel haladta meg a korábbi legnagyobb értéket. Méréseink alapján becslést adtam a ZnTe négyfotonos abszorpciós együtthatójára [16].

IV. Az eredmények hasznosítása

Az 1. és 2. tézispontban összefoglalt eredmények nagy teljesítményű, kevés ciklusú fényimpulzusok, valamint ezek segítségével akár atomi skálájú tér- és időbeli felbontást lehetővé tevő röntgenimpulzusok és elektroncsomagok előállításában használhatók. A rövid impulzusokkal pumpált optikai parametrikus erősítéssel kapcsolatos munkám (ld. 2. tézispont)

célja a módszer nagy energiára való skálázhatóságának vizsgálata volt. A munka előtanulmány volt a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben, illetve a müncheni Ludwig Maximilians Egyetem CALA intézetében megépülő Petawatt Field Synthesizer rendszerhez. Ez egy pikoszekundumos impulzusokkal pumpált, néhány ciklusú, PW teljesítményű optikai parametrikus erősítő rendszer, amely többek között nagy fotonenergiájú attoszekundumos röntgenimpulzusok keltésére és ezek széleskörű alkalmazására szolgál.

A 3. és 4. tézispontokban tárgyalt elméleti eredmények – elsősorban a pumpáló impulzushossz optimalizálása – tették lehetővé extrém nagy, közel 0.5 mJ energiájú THz-es impulzusok hatékony előállítását (5. és 6. tézispontok). A technológiát más csoportok is átvették és eredményesen használták pl. THz-es elektrongyorsítás demonstrálására is. A jövőben ez a technológia alapja lehet anyagvizsgálatra és orvosi alkalmazásokra használható, kompakt THz-es elektron- és protongyorsítóknak, illetve röntgenforrásoknak. Jelentős részben a 3–6. tézispontok eredményein alapul a Pécsi Tudományegyetem által a szegedi ELI-ALPS számára végzett kutatás-fejlesztési projekt, különösen az extrém nagy energiájú THz-es forrás kifejlesztése.

A 4. tézispontban vizsgált kontakt rácisos elrendezést más csoportok is vizsgálni kezdték, illetve megvalósítását célul tűzték ki. Munkánk elvezetett a félvezető anyagú kontakt rácisos THz forrás demonstrálásához, amely a 10. tézispont tárgya.

A 7. tézispont a THz nyálábméret pumpáló intenzitástól való függését tárgyalja, amelynek figyelembevétele nagyintenzitású THz-es forrásoknál és ezek alkalmazásainál fontos lehet. Az effektust figyelembe vettük például az ELI-ALPS számára kifejlesztett nemlineáris THz-es spektroszkópai berendezés konstrukciójánál.

A 8. tézispontban vizsgált hullámvezető struktúrájú THz-es forrás koncepciója eddig egy-egy, Magyarországon illetve az

USA-ban megadott szabadalomban hasznosult; a megvalósítás terveink között szerepel. A módszer lineáris és nemlineáris THz-es spektroszkópiai vizsgálatokra vagy THz-es képalkotásra alkalmas nagy átlagteljesítményű THz-es forrásokat eredményezhet.

A 9–11. tézispontban tárgyalt elméleti és kísérleti eredmények nagy energiájú és nagy térerősségű THz-es impulzusok keltésére hatékony és jól skálázható módszert adtak, amely félvezető anyagokon alapul. Várható, hogy a közeljövőben ez az új technológia számos alkalmazási területen bevezethető lesz, így pl. a THz-es részecskegyorsítók egy második, még kompaktabb generációjának alapja lehet. Ezt nagymértékben segítheti az infravörös lézertechnológia utóbbi időben érzékelhető ígéretes fejlődése.

A tézisekben hivatkozott közlemények

- [1] **J. A. Fülöp**, Zs. Major, B. Horváth, F. Tavella, A. Baltuška, and F. Krausz, “Shaping of picosecond pulses for pumping optical parametric amplification,” *Appl. Phys. B* **87**, 79 (2007)
- [2] **J. A. Fülöp**, Zs. Major, A. Henig, S. Kruber, R. Weingartner, T. Clausnitzer, E.-B. Kley, A. Tünnermann, V. Pervak, A. Apolonski, J. Osterhoff, R. Hörlein, F. Krausz, and S. Karsch, “Short-pulse optical parametric chirped-pulse amplification for the generation of high-power few-cycle pulses,” *New J. Phys.* **9**, 438 (2007)
- [3] **J. A. Fülöp**, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling, “Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification,” *Opt. Express* **18**, 12311 (2010)
- [4] M. C. Hoffmann and **J. A. Fülöp**, “Intense ultrashort terahertz pulses: generation and applications,” *J. Phys. D* **44**, 083001 (2011)

- [5] **J. A. Fülöp** and J. Hebling, “Applications of tilted-pulse-front excitation,” Chapter 11 in K. Y. Kim (ed.), “Recent optical and photonic technologies,” ISBN 978-953-7619-71-8 (InTech, Rijeka, 2010)
- [6] **J. A. Fülöp**, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling, “High energy THz pulse generation by tilted pulse front excitation and its nonlinear optical applications,” *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* **32**, 553 (2011)
- [7] **J. A. Fülöp**, L. Pálfalvi, M. C. Hoffmann, and J. Hebling, “Towards generation of mJ-level ultrashort THz pulses by optical rectification,” *Opt. Express* **19**, 15090 (2011)
- [8] L. Pálfalvi, **J. A. Fülöp**, G. Almási, and J. Hebling, “Novel setups for extremely high power single-cycle terahertz pulse generation by optical rectification,” *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171107 (2008)
- [9] **J. A. Fülöp**, L. Pálfalvi, S. Klingebiel, G. Almási, F. Krausz, S. Karsch, and J. Hebling, “Generation of sub-mJ terahertz pulses by optical rectification,” *Opt. Lett.* **37**, 557 (2012)
- [10] **J. A. Fülöp**, Z. Ollmann, Cs. Lombosi, C. Skrobel, S. Klingebiel, L. Pálfalvi, F. Krausz, S. Karsch, and J. Hebling, “Efficient generation of THz pulses with 0.4 mJ energy,” *Opt. Express* **22**, 20155 (2014)
- [11] C. Vicario, B. Monozslai, Cs. Lombosi, A. Mareczko, A. Courjaud, **J. A. Fülöp**, and C. P. Hauri, “Pump pulse width and temperature effects in lithium niobate for efficient THz generation,” *Opt. Lett.* **38**, 5373 (2013)
- [12] Cs. Lombosi, Gy. Polónyi, M. Mechler, Z. Ollmann, J. Hebling, and **J. A. Fülöp**, “Nonlinear distortion of intense THz beams,” *New J. Phys.* **17**, 083041 (2015)
- [13] L. Pálfalvi, **J. A. Fülöp**, and J. Hebling, “Absorption-reduced waveguide structure for efficient THz generation,” *Appl. Phys. Lett.* **107**, 233507 (2015)

- [14] W. Schneider, A. Ryabov, Cs. Lombosi, T. Metzger, Zs. Major, **J. A. Fülöp**, and P. Baum, “800-fs, 330- μ J pulses from a 100-W regenerative Yb:YAG thin-disk amplifier at 300 kHz and THz generation in LiNbO₃,” *Opt. Lett.* **39**, 6604 (2014)
- [15] Gy. Polónyi, B. Monoszlai, G. Gäumann, E. J. Rohwer, G. Andriukaitis, T. Balciunas, A. Pugzlys, A. Baltuska, T. Feurer, J. Hebling, and **J. A. Fülöp**, “High-energy terahertz pulses from semiconductors pumped beyond the three-photon absorption edge,” *Opt. Express* **24**, 23872 (2016)
- [16] Gy. Polónyi, M. I. Mechler, J. Hebling, and **J. A. Fülöp**, “Prospects of semiconductor terahertz pulse sources,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **23**, 8501208 (2017)
- [17] **J. A. Fülöp**, Gy. Polónyi, B. Monoszlai, G. Andriukaitis, T. Balciunas, A. Pugzlys, G. Arthur, A. Baltuska, and J. Hebling, “Highly efficient scalable monolithic semiconductor terahertz pulse source,” *Optica* **3**, 1075 (2016)